

На правах рукописи



КОРОЛЕВ Леонид Юрьевич

**АЛГОРИТМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (в технике и технологиях)**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА 2021

Работа выполнена на кафедре инфокоммуникационных технологий и систем связи ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Васильев Константин Константинович

Официальные оппоненты: **Митрохин Максим Александрович,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
университет», заведующий кафедрой
вычислительной техники;

Андрянов Никита Андреевич,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации»,
доцент департамента анализа данных
и машинного обучения факультета
информационных технологий и анализа
больших данных

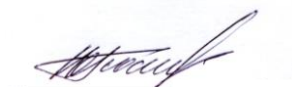
Ведущая организация – Ульяновский филиал ФГБУН
«Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова
Российской академии наук»

Защита состоится «__»_____ 2021 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.186.04 в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» и на сайте https://dissov.pnzu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/korolev

Автореферат разослан «__»_____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Косников Юрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современный уровень развития материалов и микропроцессорной техники позволяет проектировать и конструировать сверхлегкие беспилотные летательные аппараты (БПЛА), способные с высокой эффективностью выполнять мониторинговые, разведывательные и другие операции. Бортовое оборудование автономных аппаратов должно обеспечивать полет БПЛА без участия человека при изменяемых условиях функционирования (например, погодной обстановки). При недоступности сигналов спутниковых навигационных систем GPS или ГЛОНАСС для повышения точности определения местоположения БПЛА применяют инерциальные навигационные системы или системы оптической навигации.

В последние годы все больший интерес вызывает групповое применение БПЛА, позволяющее повысить надежность выполнения миссии. Кроме того, использование нескольких БПЛА значительно сокращает время выполнения задачи, например картографирования местности, патрулирования территории, действий при чрезвычайных ситуациях.

Решение групповых задач сталкивается с рядом особенностей, характерных для организации взаимодействия автономных систем между собой. Среди таких особенностей выделяют вопросы формирования строя и управления группой БПЛА. Повысить точность определения параметров движения БПЛА при групповом взаимодействии возможно с помощью комплексирования данных относительных параметров группы БПЛА. Возникает задача совместной обработки информации, полученной от различных систем измерения параметров движения. Диссертационная работа посвящена повышению точности определения параметров движения БПЛА при высоких погрешностях измерений или нестабильной работе спутниковых систем позиционирования за счет комплексной обработки собственных и взаимных оценок координат и скоростей группы БПЛА.

Исследование и синтез информационно-управляющих систем для коллективов роботов, использующих методы многоканального синхронного получения и обработки информации, входят в Программу фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период 2021–2035 гг.

Вопросы синтеза и анализа методов оценивания изменяющихся параметров рассматривались в работах ряда российских и зарубежных исследователей, среди которых следует выделить труды В. И. Тихонова, Ю. Г. Сосулина, А. И. Перова, М. С. Ярлыкова, А. Р. J. L. Sage, T. S. Melse Huang, J. D. Robbins. Решение задач межсамолетной навигации, в частности посадки и предотвращения столкновений с применением наземного комплекса, представлено в работах В. К. Орлова, О. И. Сауты, Ю. С. Юрченко, J. J. Corcoran, P. M. Doane. Исследования в области взаимодействия БПЛА в группе проводятся учеными К. С. Амелиным, Н. О. Амелиной, В. И. Васильевым, Р. А. Мунасыповым, A. Abdessameud, A. Tayebi. Вопросы теории управления,

в том числе навигации, и оптимизации систем рассматриваются в работах А. А. Красовского, В. Н. Букова, В. Н. Сизых, О. Н. Скрыпника, J. J. Ducard, Khac Duc Do, Jie Pan.

Повышенный интерес российских и зарубежных исследователей к теме обработки информации и взаимодействия БПЛА в группе подтверждает актуальность научной задачи совершенствования систем навигации и управления группой автономных аппаратов. Тем не менее в настоящее время практически отсутствуют работы, посвященные применению систем межсамолетной навигации для повышения точности определения местоположения БПЛА.

Целью диссертационной работы является повышение точности определения изменяющихся параметров движения группы БПЛА на основе разработки и моделирования алгоритмов совместной фильтрации измерений собственных и взаимных координат и скоростей БПЛА.

Для достижения цели необходимо решить ряд **задач**:

1. Выявить недостатки существующих систем измерения параметров движения групп БПЛА, методов и алгоритмов комплексирования информации.
2. Построить математические модели изменяющихся многомерных параметров при движении группы БПЛА. Сформировать модели измерения этих параметров.
3. Разработать алгоритмы фильтрации многомерных параметров движения группы БПЛА с учетом разнородности информации, поступающей от датчиков различных типов.
4. Провести сравнительный анализ и оптимизацию разработанных алгоритмов по величине дисперсии ошибок и вычислительным затратам.
5. Разработать и исследовать алгоритмы адаптивной фильтрации параметров движения группы БПЛА при неточно известных уровнях внешних возмущений.
6. Разработать программный комплекс для моделирования работы алгоритмов комплексирования параметров движения с применением универсальной и удобной среды программирования.

Объектом исследования диссертационной работы является система данных, получаемых от разных источников параметров движения БПЛА.

Предметом исследования являются модели изменения и алгоритмы фильтрации многомерных параметров движения группы БПЛА.

Методы исследования. В диссертационной работе используются методы системного анализа, обработки информации, теории вероятностей, математической статистики, теории фильтрации и теории эксперимента. Исследования выполнены с применением математического моделирования и использованием программного обеспечения, включая среду программирования MATLAB и программные средства обработки результатов и представления графических изображений.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует пунктам 2, 3, 4 и 5 паспорта специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в технике и технологиях).

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Предложены математические модели изменяющихся параметров движения группы БПЛА, отличающиеся от известных тем, что в качестве исходных данных модели используется вектор измерений параметров, который включает показания датчиков определения собственных и взаимных координат и скоростей движения, что позволило синтезировать алгоритмы совместной обработки данных от разных источников, обеспечивающие наименьшие погрешности определения координат и скоростей БПЛА.

2. Разработаны алгоритмы совместной обработки параметров группы БПЛА, основанные на защищенном патентом способе, отличающиеся тем, что обработка параметров осуществляется в два этапа: на первом этапе выполняется совместное статическое комплексирование собственных и взаимных координат и скоростей группы, а на втором – раздельная фильтрация параметров движения каждого БПЛА, что позволяет сократить вычислительные затраты на 25–65 % при увеличении дисперсии ошибок фильтрации на 10–20 %.

3. Разработаны двухэтапные алгоритмы фильтрации параметров группы БПЛА, отличающиеся тем, что на первом этапе выполняется статическое комплексирование собственных и взаимных координат отдельно от собственных и взаимных скоростей группы, а на втором этапе применяются статические оценки скоростей в одномерных фильтрах координат для каждого БПЛА, что обеспечивает дополнительное снижение вычислительных затрат в 1,5–4 раза при высокой точности измерения скорости.

4. Предложены два адаптивных алгоритма, предназначенные для совместной обработки параметров движения группы БПЛА в условиях неизвестных внешних случайных воздействий, отличающиеся оцениванием уровня влияния внешних воздействий на основе точных измерений скоростей перемещения БПЛА и применением оценок для фильтрации параметров движения, что позволяет в условиях неопределенности повысить точность оценивания параметров в 3–5 раз при увеличении времени вычислений в пределах допустимого интервала, определенного периодом между соседними измерениями.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в совершенствовании средств группового взаимодействия БПЛА: математических моделей изменяющихся параметров движения группы БПЛА, алгоритмов совместной обработки данных для повышения точности определения параметров движения группы БПЛА и снижения вычислительных затрат.

Практическая значимость работы заключается в создании программного комплекса, предназначенного для совместной обработки параметров движения группы БПЛА. Реализация алгоритмов обеспечивает повышение точности определения координат и скоростей перемещения группы БПЛА за счет использования информации о взаимном положении БПЛА и их скоростей. Разработанный программный комплекс позволяет проводить моделирование работы алгоритмов с целью определения оценок координат с заданными

ми начальными условиями при проектировании систем управления летательными аппаратами. Реализация результатов работы подтверждается актами внедрения.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается сходимостью рассчитанных и экспериментальных данных, представлением материалов на конференциях, внедрением результатов работы, защитой интеллектуальной собственности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели динамического изменения параметров движения БПЛА и получения измеренных значений параметров, позволяющие адекватно описать процессы движения групп БПЛА.

2. Двухэтапные алгоритмы совместной обработки параметров движения группы БПЛА, включающие этап совместного статического комплексирования собственных и взаимных координат и скоростей и этап фильтрации параметров движения группы БПЛА.

3. Двухэтапные алгоритмы совместной обработки параметров движения каждого отдельного БПЛА, действующего в составе группы, включающие этап раздельного статического комплексирования координат и скоростей группы и этап фильтрации параметров движения каждого БПЛА.

4. Адаптивные алгоритмы совместной обработки параметров движения группы БПЛА, учитывающие оценки неизвестных случайных внешних воздействий.

5. Программный комплекс для моделирования работы алгоритмов, расчета и визуального представления показателей эффективности методов оценивания параметров движения группы БПЛА.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X, XI Всероссийские научно-практические конференции (с участием стран СНГ) «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2017, 2018); XXI, XXII научно-практические конференции молодых ученых, аспирантов и студентов НИ МГУ им. Н. П. Огарёва (Саранск, 2017, 2018); Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» (Самара, 2018); XXIV, XXV, XXVI международные научно-технические конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2018, 2019, 2020); XLVII научная конференция «Огарёвские чтения» (Саранск, 2019); Всероссийская конференция (с международным участием) «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2019» (Москва, 2019); 2-я Всероссийская конференция «Современные технологии обработки сигналов» (Москва, 2019); VI Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020)» (Самара, 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 3 работы в изданиях, включенных в перечень ВАК, 14 работ в трудах и материалах международных, всероссийских и вузовских конференций, получены

патент на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Положения и результаты, которые выносятся на защиту и составляют основное содержание диссертации, принадлежат лично автору или получены при его непосредственном участии. Автором получены результаты математического моделирования и алгоритмизации вычисления оценок координат и скоростей группы БПЛА. Проведена оценка вычислительной сложности алгоритмов. Получены результаты статистического моделирования при учете вероятностного влияния на состояние БПЛА внешних неконтролируемых воздействий и применении существующих систем определения собственных и взаимных координат и скоростей. Разработан программный комплекс для моделирования работы алгоритмов обработки экспериментальных данных. Проведен анализ предложенных методов, сформулированы выводы об их эффективности. Автором осуществлялась подготовка материалов для представления на конференциях, публикаций и защиты результатов интеллектуальной деятельности.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, четыре главы основного материала, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы, приложения. Материал изложен на 148 страницах, содержит 115 страниц основной части, включающей 42 рисунка и 2 таблицы. Список литературы состоит из 112 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность темы исследования и степень ее разработанности, цели и задачи, научная новизна, практическая значимость работы, приведены методология и методы исследования, изложены положения, выносимые на защиту, приведена апробация результатов.

В первой главе представлен обзор существующих датчиков определения собственных и взаимных координат групп БПЛА. Проведен анализ известных способов комплексирования данных от различных источников информации. Рассмотрены основные подходы к моделированию работы систем определения координат. Выявлены недостатки существующих решений. Сформулированы основные задачи диссертационной работы по синтезу алгоритмов обработки информации, моделированию процессов работы алгоритмов и анализу их эффективности.

Вторая глава посвящена формированию математических моделей наблюдений и изменения параметров движения группы БПЛА. Рассмотрены модели динамического изменения вектора состояния системы в дискретном времени. Представлены алгоритмы комплексирования данных от различных источников информации.

Известно, что оптимальная система управления включает в себя оптимальный фильтр и регулятор, обеспечивающий движение по заданной траектории. Оптимальный фильтр Калмана (ФК) обычно строится на основе измерений собственных координат каждого БПЛА. Вместе с тем имеются

возможности использовать взаимные измерения координат и скоростей в группе БПЛА для повышения точности оценивания координат. Однако это приводит к значительному увеличению объема вычислений. В связи с этим возникает актуальная задача рассмотрения и оптимизации возможных вариантов построения фильтра для объединения собственных и взаимных наблюдений.

Пусть вектор оцениваемых параметров каждого l -го из M БПЛА $\mathbf{x}_{pi}^l = [\mathbf{x}_i^{(l)T} \quad \mathbf{v}_i^{(l)T}]^T$ включает вектор декартовых координат $\mathbf{x}_i^l = [x_i^l \quad y_i^l \quad z_i^l]^T$ и вектор проекций скоростей на координатные оси $\mathbf{v}_i^l = [v_{xi}^l \quad v_{yi}^l \quad v_{zi}^l]^T$ в момент времени t_i . Верхними индексами l или k обозначены номера БПЛА для координат, скоростей, наблюдений и других переменных, при этом $l, k = 1, 2, \dots, M, l \neq k$. Индексом p обозначены векторы и матрицы, содержащие элементы для всех оцениваемых параметров. Для оценки координат и скоростей БПЛА, взаимодействующих в группе, могут применять как автономные датчики, например инерциальные, спутниковые или оптические, так и датчики для измерения взаимных координат и скоростей. Наблюдения относительных координат пересчитываются в разности всех $\mathbf{x}_{pi}^l - \mathbf{x}_{pi}^k$ или части $\mathbf{x}_i^l - \mathbf{x}_i^k, \mathbf{v}_i^l - \mathbf{v}_i^k$ параметров l -го и k -го БПЛА. На рисунке 1 схематично представлен строй из трех БПЛА с изображением измерений собственных и взаимных параметров положения.

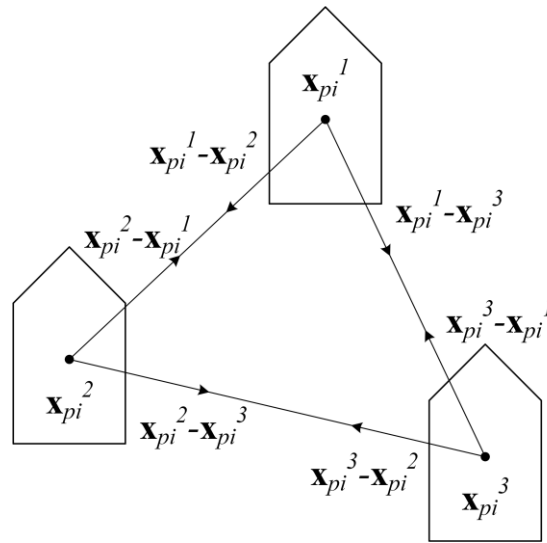


Рисунок 1 – Схематичное изображение строя беспилотных летательных аппаратов

Вектор наблюдений параметров движения группы из M БПЛА $\mathbf{z}_{pi} = [\mathbf{z}_{xi}^T \quad \mathbf{z}_{vi}^T]^T$ включает векторы наблюдений координат и скоростей. Вектор наблюдений координат \mathbf{z}_{xi} состоит из наблюдения собственных координат каждого БПЛА $z_{xi}^l = x_i^l + n_{xi}^l$ и набора наблюдений относительных координат всех аппаратов в группе $z_{xi}^{lk} = (x_i^l - x_i^k) + n_{xi}^{lk}, l = 1, 2, \dots, M, l \neq k,$

$i=1, 2, \dots$. Аналогичную структуру имеют наблюдения собственных и взаимных скоростей. $n_{xi}^l, n_{xi}^{lk}, n_{vi}^l, n_{vi}^{lk}$ – независимые гауссовские погрешности наблюдений с нулевыми средними и заданными ковариационными матрицами. В векторно-матричной форме погрешности наблюдений координат и скоростей можно объединить в вектор погрешностей наблюдений $\mathbf{n}_{pi} = [\mathbf{n}_{xi}^T \ \mathbf{n}_{vi}^T]^T$. Ковариационные матрицы ошибок представляются в виде $M\{\mathbf{n}_{pi}\mathbf{n}_{pi}^T\} = \mathbf{V}_{npi}$, $M\{\mathbf{n}_{xi}\mathbf{n}_{xi}^T\} = \mathbf{V}_{nxi}$, $M\{\mathbf{n}_{vi}\mathbf{n}_{vi}^T\} = \mathbf{V}_{nvi}$.

Модель наблюдений в векторно-матричной форме будет состоять из выражений

$$\mathbf{z}_{pi} = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_{pi} + \mathbf{n}_{pi}; \quad \mathbf{z}_{xi} = \mathbf{C}_x \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_{xi}; \quad \mathbf{z}_{vi} = \mathbf{C}_v \mathbf{v}_i + \mathbf{n}_{vi}, \quad (1)$$

где $\mathbf{C}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_x & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_v \end{bmatrix}$, $\mathbf{C}_x = \mathbf{C}_v = \mathbf{C}$ – матрицы, определяющие все или часть наблюдаемых компонент вектора параметров движения.

Модель изменения состояния параметров:

$$x_i^l = x_{(i-1)}^l + v_{(i-1)}^l T_i, \quad v_i^l = v_{(i-1)}^l + g_i^l u_i^l + a_{xi}^l T_i \xi_i^l, \quad (2)$$

где T_i – интервал времени между соседними наблюдениями; $g_i^l u_i^l$ – сигналы управления; a_{xi}^l – среднее значение ускорения l -го БПЛА, вызванное нестабильностью работы двигателей и внешними воздействиями; ξ_i^l – независимая случайная величина с нулевым средним и единичной дисперсией.

Векторное уравнение состояния, описывающее динамику изменения параметров в дискретном времени, будет иметь вид

$$\mathbf{x}_{pi} = \Phi_{pi} \mathbf{x}_{p(i-1)} + \mathbf{G}_i \mathbf{u}_i + \mathbf{H}_i \boldsymbol{\xi}_{pi}, \quad (3)$$

где Φ_{pi} – матрица, описывающая изменение состояния системы в дискретном времени; \mathbf{G}_i – матрица эффективности управления; \mathbf{u}_i – вектор сигналов управления; \mathbf{H}_i – матрица, определяющая влияние последовательности случайных величин $\boldsymbol{\xi}_{pi} = [0 \ \boldsymbol{\xi}_i^T]^T$, $\boldsymbol{\xi}_i = [\xi_i^1 \ \xi_i^2 \ \dots \ \xi_i^M]^T$ с ковариационной матрицей $M\{\boldsymbol{\xi}_{pi}\boldsymbol{\xi}_{pi}^T\} = \mathbf{V}_{\xi i}$.

На основе модели наблюдений (1) и модели динамического изменения (2) параметров движения группы БПЛА выражения стандартного векторного ФК примут вид

$$\hat{\mathbf{x}}_{pi} = \hat{\mathbf{x}}_{эpi} + \mathbf{B}_{pi}(\mathbf{z}_{pi} - \mathbf{C}_p \hat{\mathbf{x}}_{эpi}), \quad (4)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_{эpi} = \Phi_{pi} \hat{\mathbf{x}}_{p(i-1)}$ – вектор прогнозируемых параметров движения; $\mathbf{B}_{pi} = \mathbf{P}_i \mathbf{C}_p^T \mathbf{V}_{npi}^{-1}$; $\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_{эi}(\mathbf{E} + \mathbf{C}_p^T \mathbf{V}_{npi}^{-1} \mathbf{C}_p \mathbf{P}_{эi})^{-1}$ – ковариационная матрица ошибок оценки $\hat{\mathbf{x}}_{pi}$; $\mathbf{P}_{эi} = \Phi_{pi} \mathbf{P}_{(i-1)} \Phi_{pi}^T + \mathbf{V}_{\xi i}$ – ковариационная матрица ошибок прогноза $\hat{\mathbf{x}}_{эpi}$; \mathbf{E} – единичная матрица.

Начальные условия фильтрации $\hat{\mathbf{x}}_{p1} = M\{\mathbf{x}_{p1}\} = 0$, $\mathbf{P}_{p1} = M\{\mathbf{x}_{p1}\mathbf{x}_{p1}^T\}$.

На рисунке 2 представлены блок-схемы алгоритмов фильтрации параметров движения группы БПЛА, основанные на защищенном патентом способе. После получения данных от систем определения собственных и взаимных параметров формируются векторы наблюдений координат \mathbf{z}_{xi} и скоростей \mathbf{z}_{vi} . При прямой оценке векторным ФК на выходе фильтра получаем расширенный вектор параметров $\hat{\mathbf{x}}_{pi}$, включающий оптимальные в плане минимума ошибок оценки координат $\hat{\mathbf{x}}_i$ и скоростей $\hat{\mathbf{v}}_i$.

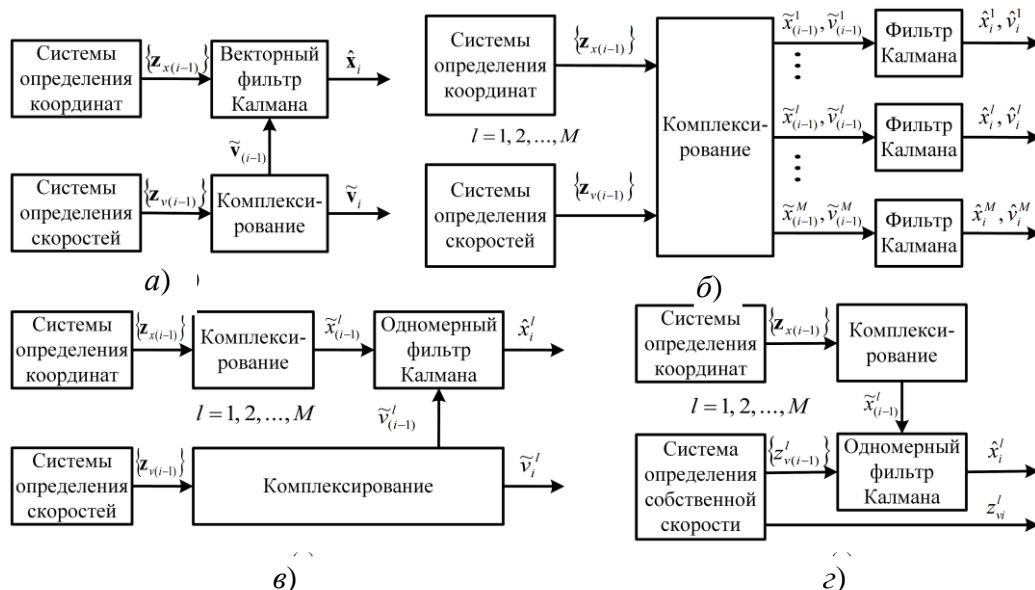


Рисунок 2 – Структуры алгоритмов оценивания параметров движения группы беспилотных летательных аппаратов

Статическое комплексирование основано на минимизации ковариационной матрицы ошибок измерения параметров при помощи метода весовых коэффициентов.

В алгоритме (рисунок 2,а) после получения очередных наблюдений параметров движения осуществляются комплексирование значений скоростей и учет полученных оценок скоростей \tilde{v}_{i-1} в векторном ФК. Оптимальная оценка вектора координат $\hat{\mathbf{x}}_i$ получается на выходе векторного ФК, а оценка вектора скоростей $\tilde{\mathbf{v}}_i$ – на выходе блока статического комплексирования.

На рисунке 2,б изображена блок-схема алгоритма обработки, включающего формирование векторов наблюдений собственных и взаимных координат $\mathbf{z}_{x(i-1)}$ и скоростей $\mathbf{z}_{v(i-1)}$. После этого производится статическое комплексирование с применением оптимальных коэффициентов. Затем выделяются координаты $\tilde{x}_{(i-1)}^l$ и скорости $\tilde{v}_{(i-1)}^l$ каждого БПЛА. Набор параметров для каждого БПЛА проходит процедуру калмановской фильтрации.

Одномерный ФК после раздельного комплексирования координат и скоростей (рисунок 2,в) подразумевает, что после формирования векторов

наблюдений координат и скоростей следует статическое комплексирование параметров, затем выделение из векторов состояния значений параметров движения каждого БПЛА. После этого на каждом БПЛА осуществляется обработка оценок собственных координат $\tilde{x}_{(i-1)}^l$ одномерным ФК при учете комплексированных оценок собственных скоростей $\tilde{v}_{(i-1)}^l$. Оптимальную оценку \hat{x}_i^l координат каждого БПЛА получаем на выходе одномерного ФК, а оценку скоростей \tilde{v}_i^l на выходе блока комплексирования.

Одномерный ФК после комплексирования координат (рисунок 2,з) заключается в статическом комплексировании значений координат и последующем выделении из векторов состояния значений параметров каждого БПЛА. После этого на каждом БПЛА осуществляется обработка оценок собственных координат $\tilde{x}_{(i-1)}^l$ одномерным ФК при учете необработанных наблюдений скоростей. Оптимальную оценку \hat{x}_i^l координат каждого БПЛА получаем на выходе одномерного фильтра Калмана.

В третьей главе осуществлен анализ эффективности работы алгоритмов оценивания параметров движения группы БПЛА. Представлены зависимости точности оценивания от погрешностей измерений собственных и взаимных координат и скоростей, от величины внешних неконтролируемых воздействий, от количества аппаратов в строю. На рисунках 3, 4 приведено сравнение алгоритмов прямой калмановской фильтрации с учетом оценок собственных и взаимных скоростей (сплошная линия) и без учета наблюдений за скоростями (длинный штрих), квазиоптимального двухэтапного алгоритма с учетом оценок скоростей (короткий штрих) и без наблюдений за скоростями (пунктирная линия).

На рисунке 3 изображены изменения СКО ошибок оценивания координат и скоростей БПЛА в дискретном времени при малых значениях внешних воздействий и нулевых ошибках определения взаимных координат и скоростей, а также при достаточно сильных внешних воздействиях и погрешностях систем взаимного определения координат, близких к погрешности автономных датчиков. В качестве начальных условий принято $M=5$, $T_i=1$ с, $\sigma_{xi}^l=10$ м, $\sigma_{vi}^l=1$ м/с, $v_i^l=10$ м/с.

Представленные графики подтверждают прямую зависимость ошибок фильтрации от точности применяемых датчиков. Анализ графиков на рисунке 3 показывает, что при низком уровне внешних возмущений и применении систем межсамолетных измерений высокой точности преимущество в эффективности имеет алгоритм векторной фильтрации. В идеальном случае, при нулевых погрешностях измерения относительных параметров, векторное оценивание параметров движения имеет малые отличия как при измерении скоростей перемещения БПЛА, так и без таких измерений. Двухэтапные процедуры оценивания имеют более заметную разницу между эффективностью алгоритмов с разными составами вектора измеряемых параметров.

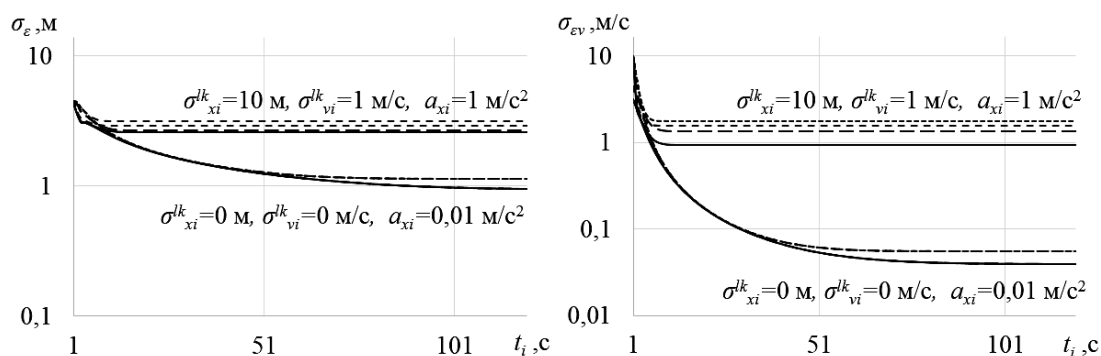


Рисунок 3 – Изменение ошибки оценивания координат и скоростей беспилотных летательных аппаратов в дискретном времени

На рисунке 4 представлены графики зависимостей СКО ошибок комплексов от количества БПЛА в строю. Оценки координат и скоростей БПЛА проведены при учете $T_i = 1$ с, $\sigma_{xi}^l = 10$ м, $\sigma_{vi}^l = 1$ м/с, $\sigma_{xi}^{kl} = 1$ м, $\sigma_{vi}^{kl} = 0,1$ м/с, $v_i^l = 10$ м/с, $a_{xi} = 0,1$ м/с².

Графики отображают значительное повышение точности оценивания параметров движения БПЛА при увеличении числа аппаратов в строю как при учете наблюдений за взаимными скоростями, так и без учета таких параметров. Анализ показывает, что определенным преимуществом обладает метод с применением векторного ФК.

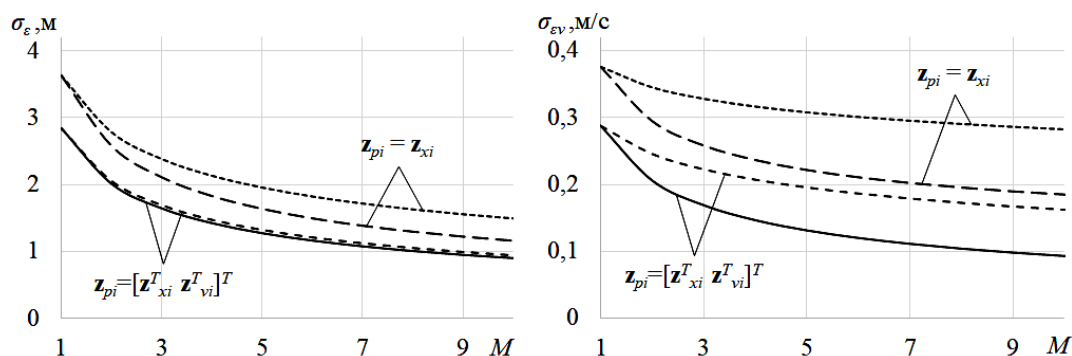


Рисунок 4 – Зависимости ошибок фильтрации от количества беспилотных летательных аппаратов в группе

На рисунках 5–7 приведено сравнение алгоритмов с применением общего векторного ФК (сплошная линия), векторной фильтрации координат после статического комплексования скоростей по блок-схеме 2а (штрихпунктир), одномерного ФК после раздельного комплексования координат и скоростей по блок-схеме 2в (длинный штрихпунктир) и одномерного ФК после комплексования координат по блок-схеме 2г (длинный штрих–двойной пунктир).

На рисунке 5 представлены изменения СКО ошибок оценивания координат с течением времени в случае применения систем определения собственных и взаимных скоростей разной точности. Начальными условиями приняты $M = 5$, $T_i = 1$ с, $a_{xi} = 0,1$ м/с², $\sigma_{xi}^l = 10$ м, $\sigma_{xi}^{kl} = 1$ м, $v_i^l = 10$ м/с.

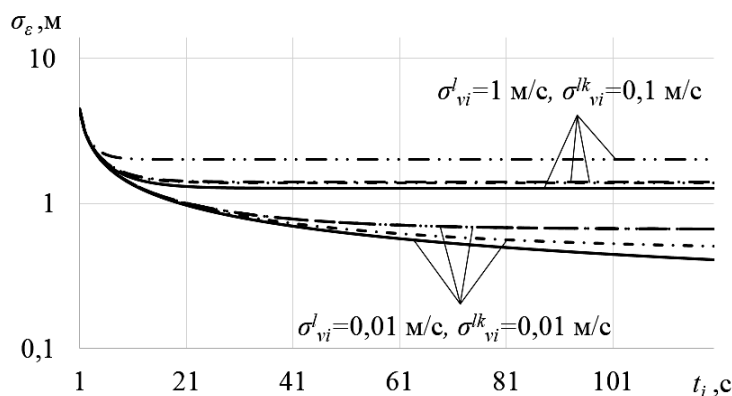


Рисунок 5 – Изменение ошибки оценивания в дискретном времени

Применение относительно точных систем определения собственных и взаимных скоростей дает большее преимущество по сравнению с малоточными системами. В случае относительно точных систем измерения скоростей алгоритм с векторной фильтрацией координат после статического комплексирования скоростей имеет преимущество перед одномерными фильтрами, которые имеют одинаковую эффективность при заданных условиях.

На рисунке 6 представлены графики зависимостей СКО ошибок комплексирования от количества БПЛА в строю. Оценки координат и скоростей БПЛА проведены при учете $T_i = 1$ с, $\sigma_{xi}^l = 10$ м, $\sigma_{vi}^l = 0,01$ м/с, $\sigma_{xi}^{kl} = 1$ м, $\sigma_{vi}^{kl} = 0,01$ м/с, $v_i^l = 10$ м/с, $a_{xi} = 0,1$ м/с².

Графики на рисунке 6 подтверждают выводы о снижении ошибок оценивания параметров движения БПЛА при увеличении числа устройств в группе. Зависимости показывают, что лучшую эффективность при оценке координат имеет алгоритм с общим векторным ФК. Ниже эффективность алгоритма векторной фильтрации после раздельного комплексирования координат и скоростей.

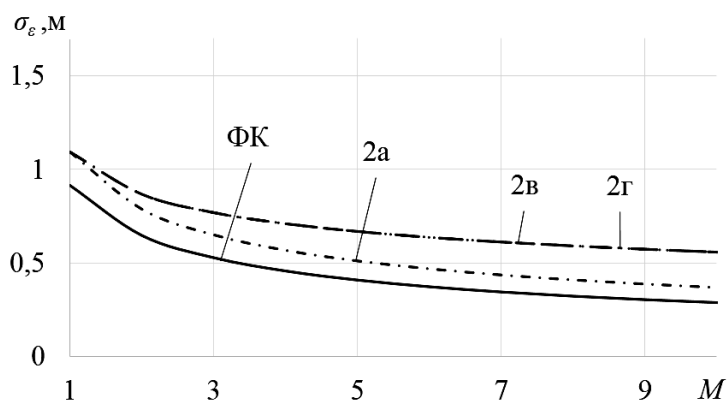


Рисунок 6 – Зависимости ошибок оценивания координат от количества беспилотных летательных аппаратов в строю

Проведена оценка вычислительной сложности алгоритмов. На рисунке 7 изображены графики зависимости затраченного на вычисление оценок вре-

мени t_a от количества БПЛА, данные которых обрабатываются. Оценка времени вычисления производится для 100 наблюдений на одном вычислительном устройстве и при одинаковых начальных условиях.

Анализ графиков показывает, что для всех методов характерно увеличение времени обработки данных при росте числа БПЛА в группе. Графики отображают значительное увеличение времени вычислений при работе алгоритмов с применением векторного ФК, причем общий фильтр требует большего времени, чем метод векторной фильтрации координат после статического комплексирования скоростей. Наименьшее время на обработку параметров движения затрачивается при оценивании одномерным ФК после комплексирования значений координат.

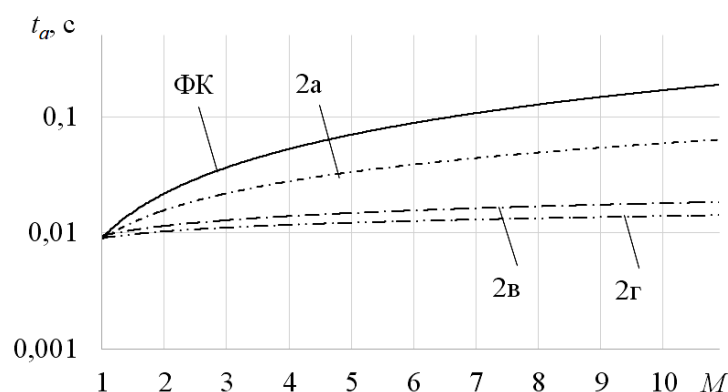


Рисунок 7 – Зависимость времени вычисления оценок от количества беспилотных летательных аппаратов

Таким образом, в случае постановки задачи обеспечения высокой точности определения параметров движения целесообразно применять двухэтапный алгоритм совместного комплексирования координат и скоростей с последующей двумерной фильтрацией параметров для каждого БПЛА. В случае использования системы с низкими показателями вычислительной мощности или приоритетного обеспечения энергоэффективности оптимально применение одномерных фильтров (2в, 2г). При неоднозначно определенных приоритетах критериев качества фильтра необходимо проведение моделирования для выявления оптимального алгоритма.

Четвертая глава содержит подробное описание программного комплекса, реализующего вычисление оценок эффективности синтезированных алгоритмов, на который получено свидетельство о государственной регистрации. Алгоритм работы программного комплекса схематично представлен в виде блоков. Для каждого блока приведено описание действий и команд для их выполнения. Проведено статистическое моделирование работы алгоритмов определения местоположения группы БПЛА с учетом показателей точности существующих датчиков определения вектора координат.

В качестве среды программирования принята система MATLAB R2017b как специализированный программный пакет для научных вычислений, наиболее полно удовлетворяющий установленным в главе требованиям.

На рисунке 8 представлена схема алгоритма работы программного комплекса.

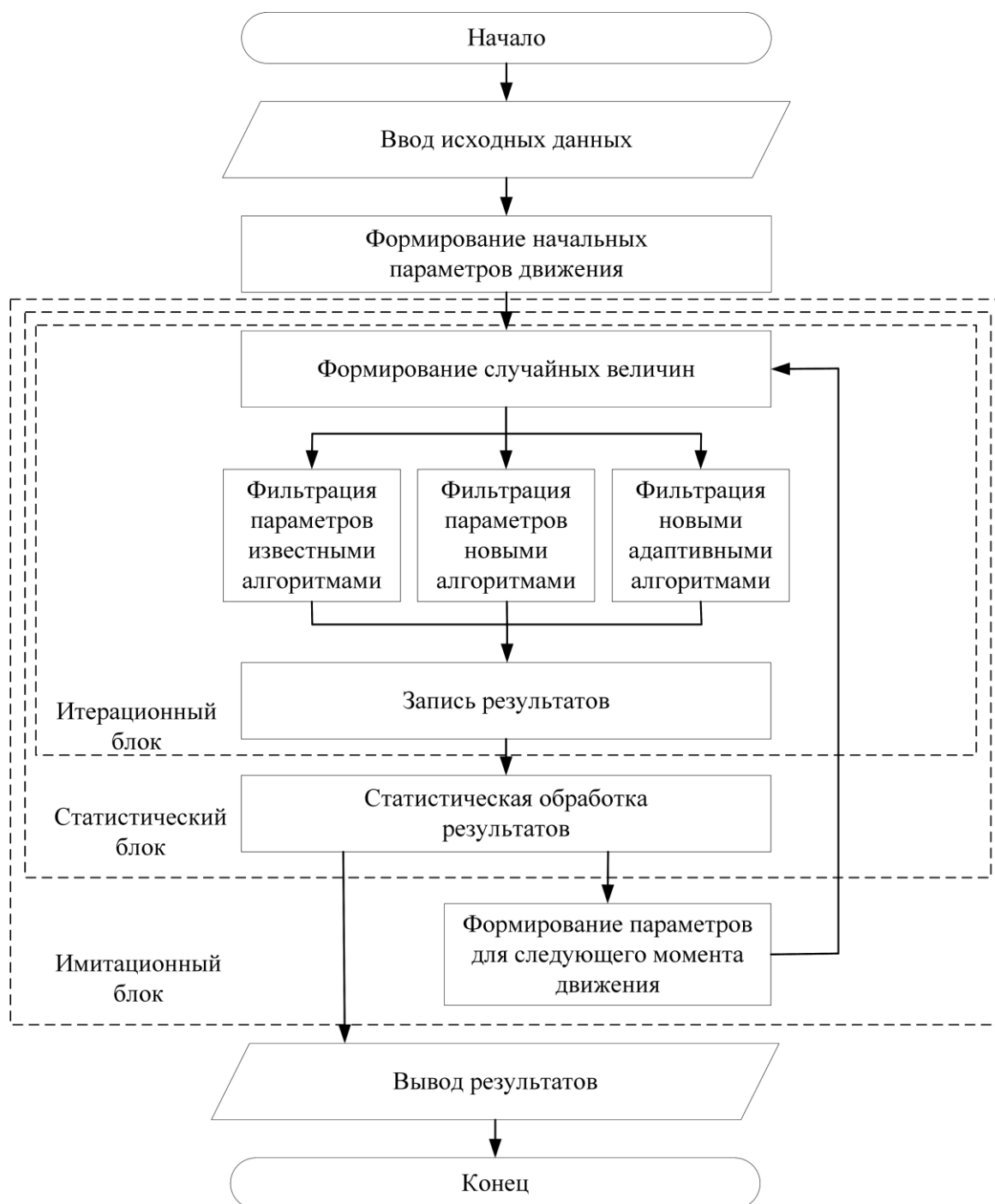


Рисунок 8 – Схема алгоритма работы программного комплекса

Блок ввода исходных данных состоит из окна ввода и присвоения переменным заданных исходных значений. В качестве исходных данных приняты количество аппаратов в группе, количество наблюдений, интервал времени между наблюдениями, величина уровня внешних воздействий, точность измерения собственных и взаимных координат и скоростей, скорость и координаты БПЛА в начале наблюдений. Блок формирования начальных параметров

движения состоит из команд, формирующих векторы и матрицы, содержащие известные до начала моделирования данные. Блок формирования случайных величин включает команды генерации значений погрешностей с заданными дисперсиями. В блок фильтрации параметров известными алгоритмами входят выражения фильтрации на основе ФК. Блок фильтрации параметров новыми алгоритмами содержит математические выражения новых алгоритмов фильтрации, представленных в главе 2. Блок фильтрации новыми адаптивными алгоритмами включает выражения фильтрации параметров движения БПЛА при неточно известном уровне влияния внешних неконтролируемых воздействий. Блок записи результатов отображает фиксацию полученных оценок параметров движения на каждой итерации статистического моделирования. Блок статистической обработки результатов содержит выражения статистической обработки экспериментальных данных, полученных из выборки, заданной количеством повторений итерационного блока. Имитационный блок осуществляет повторения итерационного и статистического блоков в заданном в исходных данных периоде имитации сеанса обработки параметров движения группы БПЛА. После окончания периода имитации осуществляется вывод полученных статистических данных в графическом и числовом виде.

Проведено статистическое моделирование работы алгоритмов определения местоположения группы БПЛА с учетом показателей точности существующих систем определения собственных и взаимных координат и скоростей движения, а также интенсивности внешних неконтролируемых воздействий. Рисунок 9 отображает зависимость статистической оценки точности определения координат от уровня внешних возмущений. Сплошной линией обозначены зависимости при работе общего векторного ФК, штриховой линией – оценки при двумерной фильтрации после статического комплексирования координат и скоростей.

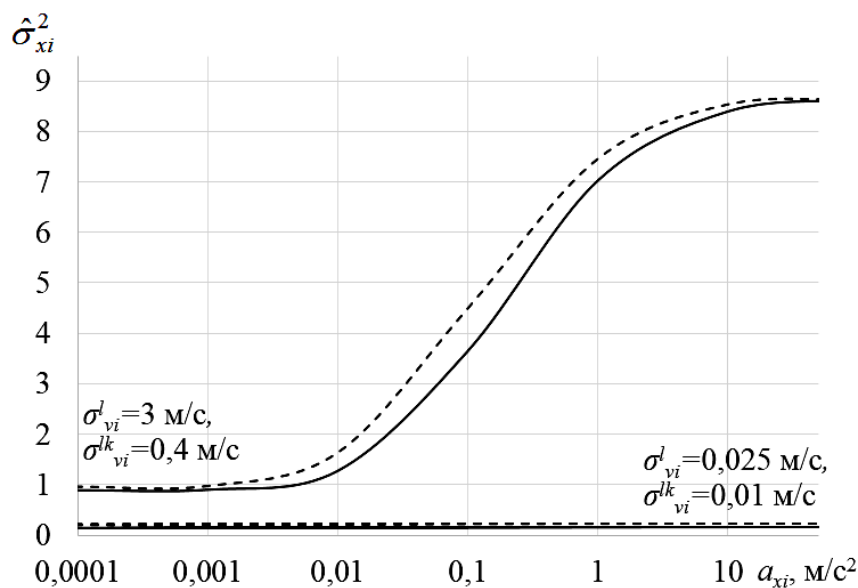


Рисунок 9 – Зависимости погрешности оценивания координат от уровня влияния внешних возмущений

Графики подтверждают выводы, что применение высокоточных систем определения скоростей с точностью до 0,3 м/с позволяет избежать роста погрешности определения местоположения при увеличении влияния внешних возмущений. В ином случае наблюдается увеличение ошибки определения координат при росте уровня воздействий. При этом скалярное оценивание уступает в точности векторной фильтрации. Из графиков на рисунке 9 следует, что величина интенсивности воздействия на систему внешних возмущений оказывает влияние на скорость снижения эффективности фильтрации.

Отсутствие точных показателей уровня возмущений увеличивает погрешность определения координат БПЛА. Для компенсации возникающих вследствие воздействия внешних возмущений погрешностей применено адаптационное расширение алгоритмов фильтрации. Исходя из выражений (2) при достаточно точных измерениях собственных скоростей БПЛА наилучшей оценкой \hat{a}_{xi}^l параметра a_{xi}^l будет

$$\hat{a}_{xi}^{2(l)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i^l - v_{(i-1)}^l)^2, \quad l=1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

Полученные оценки уровня влияния внешних возмущений можно применить в алгоритмах фильтрации при оценивании параметров движения БПЛА.

Другим способом построения алгоритма адаптации является расширение вектора состояния параметров показателями a_{xi}^l для каждого БПЛА:

$$x_i^l = x_{(i-1)}^l + v_{(i-1)}^l T_i, \quad v_i^l = v_{(i-1)}^l + g_i^l u_i^l + a_{x(i-1)}^l T_i \xi_i^l, \quad a_{xi}^l = a_{x(i-1)}^l + b_i w_i^l, \quad l=1, 2, \dots, M, \quad (6)$$

где b_i – параметр, определяющий скорость изменения внешних воздействий; w_i^l – стандартная нормальная случайная величина.

Совокупность этих уравнений можно записать в векторной форме:

$$\mathbf{x}_{pi}^l = \Phi \mathbf{x}_{p(i-1)}^l + \mathbf{G}_i \mathbf{u}_i + \mathbf{g}(\mathbf{x}_{p(i-1)}^l) \boldsymbol{\xi}_i^l, \quad (7)$$

где $\mathbf{g}_i(\mathbf{x}_{p(i-1)}^l)$ – матричная функция вектора $\mathbf{x}_{p(i-1)}^l = [x_{(i-1)}^l \quad v_{(i-1)}^l \quad a_{(i-1)}^l]^T$.

При этом в алгоритме фильтрации (4) изменится только уравнение для ковариационной матрицы ошибок прогноза

$$\mathbf{P}_{\pi i} = \Phi_{pi} \mathbf{P}_{(i-1)} \Phi_{pi}^T + \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_{p(i-1)}^l) \mathbf{V}_{\xi i} \mathbf{g}_i^T(\mathbf{x}_{p(i-1)}^l).$$

На рисунках 10–12 зависимости при оценке стандартным векторным ФК обозначены пунктирной линией, адаптивные алгоритмы с подстановкой оценок (АПО) уровня внешних возмущений в выражения фильтрации представлены штриховой линией. Кривые, полученные для расширенного фильтра Калмана (РФК), обозначены сплошной линией. На рисунке 10 представлено изменение точности оценки координат БПЛА с течением времени при применении систем определения собственных и взаимных скоростей разной точно-

сти. Моделирование производилось при следующих параметрах: $M = 2$, $T_i = 1$ с, $\sigma_{xi}^l = 10$ м, $\sigma_{xi}^{kl} = 1$ м, $v_i^l = 10$ м/с, $a_{x1} = 1$ м/с², $b_i = 0$.

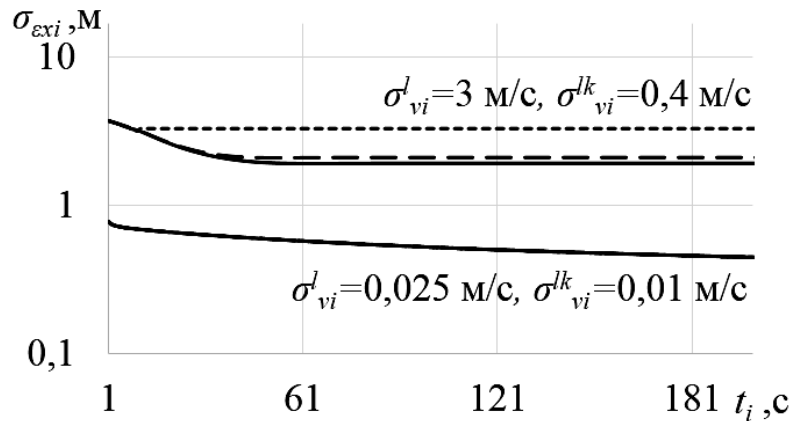


Рисунок 10 – Изменение точности оценок координат с течением времени при применении адаптивных алгоритмов оценивания

Для точных систем определения скоростей перемещения с точностью до 0,3 м/с погрешность оценивания координат одинакова при применении стандартных и адаптивных алгоритмов фильтрации. При использовании относительно малоточных систем определения скоростей перемещения алгоритмы адаптивной фильтрации имеют преимущество на 35–40 % перед стандартной фильтрацией при заданных начальных условиях. При этом оценивание РФК на 3–5 % точнее, чем при алгоритме прямой подстановки оценок уровня внешних возмущений. Из графиков следует, что изменение точности оценок координат с течением времени стремится к установившемуся значению. Последующие графики будем формировать с учетом таких установившихся значений при $t_i = 180$ с.

На рисунке 11 представлены графики зависимостей дисперсий ошибок адаптивной фильтрации от уровня реальных неконтролируемых воздействий в сравнении со стандартным векторным ФК. Статистические оценки координат проведены при учете $t_i = 180$ с, $T_i = 1$ с, $\sigma_{xi}^l = 10$ м, $\sigma_{xi}^{kl} = 1$ м, $\sigma_{vi}^l = 3$ м/с, $\sigma_{vi}^{kl} = 0,4$ м/с, $v_i^l = 10$ м/с, $b_i = 0$. Штрихпунктирной линией представлено минимально достижимое значение (МДЗ) дисперсии ошибки оценивания координат. На рисунке 11,а при $a_{fxi} = 0,1$ м/с², 11,б при $a_{fxi} = 1$ м/с².

Анализ графиков на рисунке 11 показывает, что МДЗ дисперсии ошибки оценивания координат достигается при применении стандартного ФК при точно известных реальных уровнях возмущений a_{xi} , при этом адаптивные алгоритмы уступают в точности на 20–50 %. При отличии a_{xi} от a_{fxi} преимущество в 3–5 раз наблюдается у активных алгоритмов фильтрации, причем больший выигрыш достигается при увеличении разницы реального уровня внешних воздействий и параметра, заданного в фильтре. Сравнение адаптивных алгоритмов показывает, что РФК эффективнее алгоритма прямой под-

становки оценок \hat{a}_{xi} в выражения фильтрации на 20–60 % в зависимости от разницы a_{xi} и a_{fxi} .

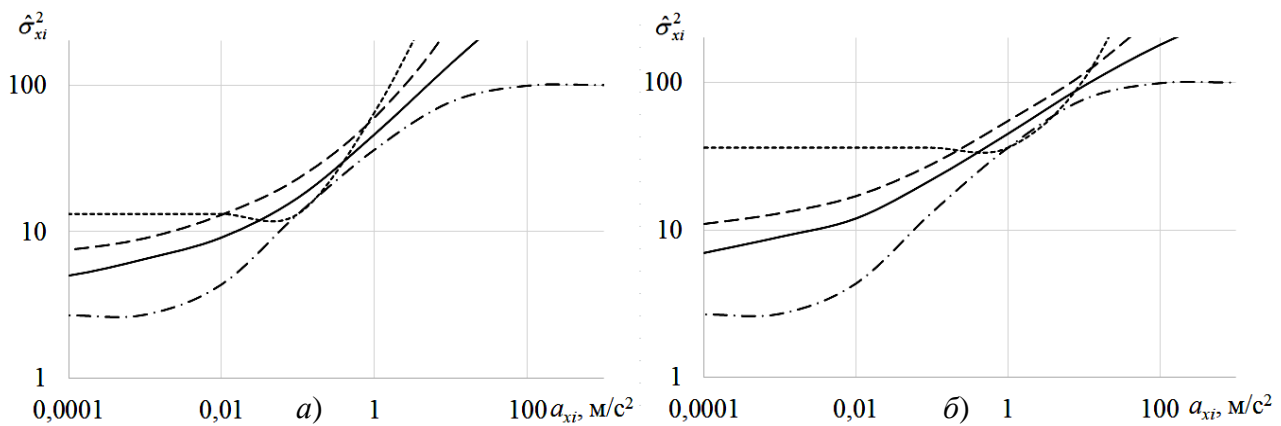


Рисунок 11 – Зависимости дисперсий ошибок фильтрации от уровня реальных неконтролируемых воздействий

Рассматриваемые методы сравнивались по величине вычислительных затрат. На рисунке 12 представлены графики зависимости затраченного на вычисление оценок времени t_a от количества БПЛА, данные которых обрабатываются. Оценка времени вычисления производится для 100 наблюдений на одном вычислительном устройстве при одинаковых начальных условиях.

На представленных графиках видно, что добавление к стандартному векторному ФК адаптивных алгоритмов оценивания уровня внешних возмущений влечет увеличение времени, затраченного на вычисление оценок координат БПЛА. Расширение вектора оцениваемых параметров значениями уровней неконтролируемых воздействий при калмановской фильтрации значительно усложняет процедуры и увеличивает время вычисления оценок координат.

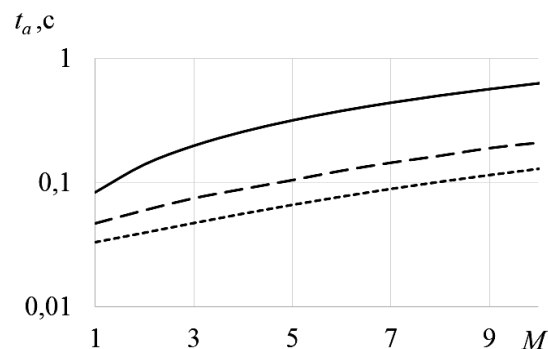


Рисунок 12 – Зависимость времени вычисления оценок от количества беспилотных летательных аппаратов

В заключении подведены основные итоги диссертационного исследования.

Приложения содержат копии актов о внедрении результатов диссертационной работы, копию свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, копию патента на изобретение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложены математические модели изменяющихся параметров движения группы БПЛА, отличающиеся от известных тем, что в качестве исходных данных модели используется вектор измерений параметров, включающий показания датчиков определения собственных и взаимных координат и скоростей движения, что позволило синтезировать алгоритмы совместной обработки данных от разных источников, обеспечивающие наименьшие погрешности определения координат и скоростей БПЛА.

2. Синтезированы алгоритмы фильтрации параметров движения БПЛА на основе векторного фильтра Калмана при учете наблюдений собственных и взаимных координат и скоростей БПЛА. Разработаны алгоритмы комплексирования, основанные на защищенном патентом способе, который состоит из двух этапов, включает статическое вычисление значений параметров движения с последующей калмановской фильтрацией.

3. Проведенный анализ эффективности показал, что комплексная обработка данных датчиков собственных и взаимных координат позволяет значительно повысить точность вычисления оценок. Взаимодействие двух аппаратов позволяет снизить погрешность определения координат и скоростей на 20–30 % по сравнению с применением тех же алгоритмов оценивания без взаимных наблюдений. Обработка данных группы из пяти БПЛА дает возможность повысить точность оценивания до 2,5 раз.

4. Разработаны алгоритмы фильтрации параметров группы БПЛА при высокой точности измерения скорости, обеспечивающие дополнительное снижение вычислительных затрат в 1,5–4 раза при незначительном ухудшении качества оценивания.

5. Представлены два алгоритма адаптивной фильтрации параметров движения группы БПЛА с учетом оценок уровня внешних возмущений. Анализ показал, что в случае отсутствия точных данных об уровне внешних возмущений предложенные адаптивные алгоритмы эффективнее стандартного векторного фильтра Калмана в 3–5 раз при малой точности систем определения скоростей перемещения. Однако алгоритмы адаптивной фильтрации в сравнении со стандартным векторным оцениванием требуют больше времени при вычислении параметров на 40–60 % при прямой подстановке оценок внешних возмущений в выражения фильтрации и в 2,5–4,5 раза при применении расширенного фильтра Калмана.

6. Разработан программный комплекс, защищенный свидетельством о государственной регистрации, применяемый для моделирования работы алгоритмов фильтрации параметров движения и вычисления погрешностей определения местоположения БПЛА, позволяющий определить наиболее эффективный алгоритм фильтрации при заданных начальных условиях.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Королёв, Л. Ю. Возможности снижения вычислительных затрат при оценивании координат группы автономных аппаратов / К. К. Васильев, Л. Ю. Королёв // Автоматизация процессов управления. – 2020. – № 2 (60). – С. 17–24. – ISSN 1991-2927.
2. Королёв, Л. Ю. Определение навигационных параметров в группе автономных аппаратов / К. К. Васильев, А. В. Бобков, Л. Ю. Королёв // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 63–70. – ISSN 2070-0814.
3. Королёв, Л. Ю. Оценивание изменяющихся координат группы автономных аппаратов / К. К. Васильев, Л. Ю. Королёв // Автоматизация процессов управления. – 2019. – № 3 (57). – С. 86–92. – ISSN 1991-2927.

Публикации в других изданиях

4. Королёв, Л. Ю. Динамическое оценивание координат группы БПЛА / К. К. Васильев, Л. Ю. Королёв // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции. – Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2019. – С. 412–418. – ISBN 978-5-9273-2777-5.
5. Королёв, Л. Ю. Оценка местоположения группы беспилотных летательных аппаратов при применении точных систем навигации / К. К. Васильев, Л. Ю. Королёв // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции. – Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2020. – С. 254–259. – ISBN 978-5-9273-3071-3.
6. Королёв, Л. Ю. Способы динамического оценивания координат для повышения точности навигации группы БПЛА / К. К. Васильев, Л. Ю. Королёв // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2019 : доклады Всероссийской конференции (с международным участием). – Москва : Московское НТО радиотехники, электроники и связи А. С. Попова, 2019. – С. 70–75. – ISBN 978-5-905278-38-9.
7. Королёв, Л. Ю. Алгоритмы оценивания координат и скоростей перемещения группы беспилотных летательных аппаратов / Л. Ю. Королёв // Современные технологии обработки сигналов. 2-я Всероссийская конференция : доклады конференции. – Москва : Московское НТО радиотехники, электроники и связи А. С. Попова, 2019. – С. 150–155. – ISBN 978-5-905278-39-6.
8. Королёв, Л. Ю. Анализ эффективности метода комплексирования навигационных параметров группы БПЛА / Л. Ю. Королёв // Материалы XXII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Научного исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва : материалы конференции. – Саранск : Нац. исслед. Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2019. – С. 140–144. – ISBN 978-5-7103-3720-2.
9. Королёв, Л. Ю. Исследование эффективности комплексирования навигационных параметров для повышения точности определения координат группы БПЛА / Л. Ю. Королёв // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. – 2018. – № 11. – С. 155–158.
10. Королёв, Л. Ю. Метод комплексирования навигационных параметров для повышения точности определения координат группы БПЛА / Л. Ю. Королёв // Материалы XXII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов

и студентов Научного исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва : материалы конференции. – Саранск : Нац. исслед. Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2019. – С. 144–147. – ISBN 978-5-7103-3720-2.

11. Королев, Л. Ю. Обзор систем навигации, используемых в непилотируемых устройствах / Л. Ю. Королев // Материалы XXI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Научного исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва : материалы конференции. – Саранск : Нац. исслед. Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2017. – С. 428–431. – ISBN 978-5-7103-3458-4.

12. Королев, Л. Ю. Основные преимущества и недостатки систем навигации, применяемых в беспилотных летательных аппаратах / Л. Ю. Королев // Материалы XXI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Научного исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва : материалы конференции. – Саранск : Нац. исслед. Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2017. – С. 431–434. – ISBN 978-5-7103-3458-4.

13. Королев, Л. Ю. Оценивание динамически изменяющихся навигационных параметров группы автономных аппаратов / Л. Ю. Королев // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020) : сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы. – Самара : Самар. нац. исслед. ун-т им. акад. С. П. Королева, 2020. – Т. 3. – С. 101–110. – ISBN 978-5-7883-1513-3.

14. Королев, Л. Ю. Повышение точности оценки координат беспилотных летательных аппаратов средствами межсамолетной навигации / Л. Ю. Королев // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции. – Воронеж : Вэлборн, 2018. – Т. 3. – С. 247–250. – ISBN 978-5-9500319-6-0.

15. Королев, Л. Ю. Применение инерциальных систем навигации для групп БПЛА / Л. Ю. Королев // XLVII Огарёвские чтения : материалы научной конференции. – Саранск : Нац. исслед. Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2019. – С. 135–138. – ISBN 978-5-7103-3750-9.

16. Королев, Л. Ю. Применение управляющих компонентов для повышения точности навигации БПЛА / Л. Ю. Королев // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Самара : Офорт, 2018. – С. 41–43.

17. Королев, Л. Ю. Сравнительный анализ алгоритмов расчета погрешности одиночного и взаимного определения координат группы беспилотных летательных аппаратов / Л. Ю. Королев // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. – Ульяновск : Ульяновск. гос. техн. ун-т, 2017. – С. 70–73.

Объекты интеллектуальной собственности

18. Пат. 2738039 Российская Федерация, МПК G 01 C 23/005, G 01 S 13/933, G 01 C 21/00. Способ определения координат группы летательных аппаратов при межсамолетной навигации / Васильев К. К., Королев Л. Ю. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва». – № 2020110580 ; заявлено 13.03.20 ; опубликовано 08.12.20, Бюллетень № 34. – 9 с.

19. Свидетельство 2020661350. Программа оценки эффективности алгоритмов определения навигационных параметров летательных аппаратов при межсамолетной навигации : программа для ЭВМ / К. К. Васильев, Л. Ю. Королев (RU) ; правообладатель ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва». № 2020660364 ; заявлено 15.09.20 ; опубликовано 22.09.20. 11 Кб.

Научное издание

Королев Леонид Юрьевич

**АЛГОРИТМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (в технике и технологиях)

Редактор *Е. П. Мухина*

Технический редактор *Ю. В. Анурова*

Компьютерная верстка *Ю. В. Ануровой*

Распоряжение № 61/198 от 22.04.2021

Подписано в печать 22.04.2021. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,39. Заказ № 120. Тираж 100.

Издательство ПГУ.

440026, Пенза, Красная, 40.

Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru